第39卷 第6期
2022年11月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

温度升高下降水和施氮对旱地春小麦产量和生物量影响的模拟与分析

张 康[1]， 聂志刚[1,2]， 王 钧[1]， 李 广[3]

（1. 甘肃农业大学信息科学技术学院，甘肃 兰州 730070； 2. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070； 3. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 为了探索温度升高下降水和施氮对半干旱地区春小麦产量和生物量的影响。基于甘肃省定西市安定区1971—2018年气象数据，依据定西市安定区凤翔镇安家沟村2014—2018年大田试验数据，利用APSIM进行了5个温度变化梯度（0 ℃，0.5 ℃，1 ℃，1.5 ℃，2 ℃），5个降水变化梯度（-20%，-10%，0%，10%，20%）和4个施氮处理（0 kg·hm^{-2}，55 kg·hm^{-2}，110 kg·hm^{-2}，220 kg·hm^{-2}）的模拟实验，通过回归方程、单因素分析和互作分析对旱地春小麦产量和生物量进行分析，通过温度升高下降水和施氮的关系对小麦产量进行分析。结果表明：（1）模型模拟的小麦产量和生物量归一化均方根误差（NRMSE）为7.47%和7.66%，模型有效性指数（M_E）为0.91和0.85，灌浆期NRMSE为1.73%，模型有效性指数为0.98，表明该模型可以较好地反映温度、降水和施氮对春小麦产量和生物量影响。（2）当温度升高时，春小麦产量和生物量呈开口向上抛物线负效应变化；当施氮量增加时，春小麦产量和生物量呈开口向下抛物线变化，阈值为122.11 kg·hm^{-2}和129.06 kg·hm^{-2}，产量和生物量的最优值为2574.86 kg·hm^{-2}和5777.39 kg·hm^{-2}；降水量增加会对春小麦产量和生物量产生呈开口向上抛物线正效应变化。（3）温度和施氮量之间的交互作用为负；温度和降水量之间的交互作用为负；施氮量和降水量之间的交互作用为正。（4）0 ℃、0.5 ℃、1 ℃、1.5 ℃、2 ℃下产量达到最优时，降水量均应增加20%，施氮量分别为：156.2 kg·hm^{-2}、149.6 kg·hm^{-2}、131.56 kg·hm^{-2}、110.0 kg·hm^{-2}、107.8 kg·hm^{-2}。（5）温度、施氮和降水3个因素对产量影响顺序为：降水>施氮>温度；合理的水氮协同能够减缓温度升高对产量的负效应。

关键词： APSIM；小麦；温度；降水；施氮；生物量；产量

气候变化对小麦产量的影响已成为公认的事实，特别是对依赖自然条件的甘肃旱作小麦影响尤为严重[1-4]。近年来，研究者在温度、肥料和水分等对小麦生长的影响方面取得了很多研究成果，逯玉兰等[5]利用APSIM模型研究温度和降水量对定西地区春小麦产量的影响，发现在降水和温度中降水是影响产量的主要因素，所有生育期中灌浆-成熟期的气候因子对产量的影响最大；曹峰等[6]利用APSIM模型研究温度升高，灌溉对旱地小麦产量的影响，发现在拔节期增加灌溉量可以减缓温度升高引起的小麦减产；刘永环等[7]通过研究不同氮温组合对小麦籽粒产量和品质的影响，发现氮肥运筹对高温胁迫条件下籽粒品质的缓解作用较小，而适当提高氮肥可以减缓灌浆期高温胁迫对小麦产量的不利影响；张涛等[8]通过研究滴灌条件下水氮耦合对春小麦光合特性及产量的影响，发现氮肥和水分对春小麦在一定范围内是相互促进的，但水分和施氮过量时，水肥利用率降低。目前的研究主要针对2个因素变化，而对于水肥协同对温度变化下作物产量调控的研究还相对较少。定西地区气温呈上升趋势，而年降水量总体呈减少趋势，存在强烈波动变化[9]。因此，本研究利用APSIM模型模拟温度升高下水氮协同对旱地春小麦产量和生物量的影响，选取对产量影响最大的灌浆期，研究在灌浆期不同温

收稿日期： 2022-03-21； **修订日期：** 2022-09-16
基金项目： 国家自然科学基金项目（32160416）；甘肃省高等学校创新基金项目（2020B-121）；甘肃省教育厅产业支撑计划项目（2021CYZC-15，2022CYZC-41）资助
作者简介： 张康（1995-），男，硕士研究生，主要研究方向为农业生态模型. E-mail: 2942138300@qq.com
通讯作者： 聂志刚. E-mail: niezg@gsau.edu.cn

度下降水和施氮对小麦产量的影响，探究不同温度下的适宜降水量和施氮量，揭示温度升高下水肥协同对旱地春小麦生产的影响机制，为应对未来温度变化下旱地春小麦生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

研究区位于黄土高原地区的甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村（104°37′E，35°35′N）。气候类型为中温带半干旱区，海拔2000 m，此区为典型的雨养地区，作物主要为春小麦，一年一熟，研究区地势平坦，无灌溉条件，年蒸发量1531 mm，年均气温6.4 ℃，年均日照时数2400 h以上，年均降雨量385.0 mm，干燥度2.53[10]。土壤为黄绵土，耕层容重1.26 $g\cdot cm^{-3}$，pH值8.36，土壤有机质含量为12.01 $g\cdot kg^{-1}$，全氮含量为0.61 $g\cdot kg^{-1}$，全磷含量为1.77 $g\cdot kg^{-1}$。

于2014—2018年在甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村进行大田试验，试验小区面积为24 m^2（6 m×4 m），保护行0.5 m。供试品种均为春小麦"定西35"，3月下旬播种，播种量按当地常规量187.5 $kg\cdot hm^{-2}$，播深7 cm，行距0.25 m。耕作方式采用当地常用的免耕方式，将春小麦在无灌溉和施氮（尿素，N含量约为46%）量为105 $kg\cdot hm^{-2}$的自然条件下进行试验，重复3次试验，得到平均产量和生物量。当地正常播种时间在3月19日前后、收获时间一般在7月15日以后，在收获时取其中20株作为实际产量和生物量样本，再以各个小区打碾产量和生物量计算公顷产量和生物量。

1.2　数据来源及处理

利用2014—2018年大田实测产量和生物量（仅指地上干生物量）数据校准和验证模型。模拟研究所需的1971—2018年气象数据来源于试验点甘肃省气象局定西市安定区历年气象资料，主要包括每日最高气温（℃）、每日最低气温（℃）、日降水量（mm）和日照时数（h）。作物品种和作物生理数据均来源于早期李广等[10]研究中的实测数据（表1）。田间管理参数均根据试验地实际管理措施设置。将APSIM模拟出的数据采用Microsoft Excel 2010软件进行初步整理汇总。利用DPS数据处理系统进行二次多项式分析，利用Matlab 2018求产量最大时降水和施氮的最优解。

1.3　APSIM模型简介

APSIM是一种综合模型[11-12]，用于模拟农业系统中的生物物理过程。主要由4部分组成:生物物理模块、管理模块、输入输出模块、中心引擎。该模型根据需要连接不同的子模块到主引擎上，为满足用户模拟需求，也可自行开发子模块。来源于早期李广等[10]研究中的实测数据，模型模拟时所需数据主要分为4部分: 作物参数、土壤参数、农间管理参数，气候参数。

表1　作物品种参数

Tab. 1　Parameters of crop varieties

参数	取值
灌浆到成熟的积温(℃)	580
春化系数	1
光周期系数	2
最大灌浆速率($mg\cdot grain^{-1}\cdot d^{-1}$)	2.30
分蘖重($g\cdot tiller^{-1}$)	1.22
单株重(g)	4
株高(mm)	1000
播种期地表蒸发系数(土壤)	7.20
发芽期地表蒸发系数(土壤)	6.20

1.4　模型校准和验证方法

通过实测值与模拟值之间的均方根误差（RMSE）、归一化均方根误差（NRMSE）和模型有效性指数（M_E）来检验模型，RMSE和NRMSE值越小，实测值与模拟值误差越小，拟合度越好[13]。模型有效性指数（M_E）用以检验模拟精度，其值越接近1，模型拟合程度和稳定性越好。

$$NRMSE = 100\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_j)^2}}{\bar{Y}} \quad (1)$$

$$M_E = 1 - \frac{\sum(Y_i - Y_j)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

式中：Y_i为田间实验测量的实测值；Y_j为APSIM模型的模拟值；$\bar{Y}$为田间实验测量的平均值。

1.5　试验设计

利用1971—2018年的气象数据进行模拟试验，在基本模拟试验环境基础上，降水波动范围在自然降水±20%内，在APSIM模型模拟中日降水量以梯度10%为比例间隔变化，温度波动范围在实际温度2 ℃内，日最高温度和日最低温度均以梯度0.5 ℃变化。4个施肥梯度大田试验以免耕覆盖为基础。设置4种不同施肥水平：（1）不施肥；（2）低量氮肥，施尿素含氮量为当地施肥的1/4，即55 $kg\cdot hm^{-2}$；（3）中量氮肥，施尿素含氮量为当地施肥的1/2，即110 kg·

hm^{-2};(4)高量氮肥,施尿素含氮量为当地施肥经验量,即220 kg·hm^{-2}。采用完全随机区组设置,分别在5个温度梯度变化下进行不同降水和施氮梯度的5×4的耦合实验,每处理3次重复,得到5×4×5×3×48组数据,平均值法得到每种情形下小麦的产量和生物量。在以上实验的基础上,得到小麦在灌浆期的籽粒干物质和逐日产量,用于不同温度和水肥协同耦合条件下旱地春小麦产量形成的动态变化模拟(表2)。对照组实验的日温度变化为0 ℃,日降水量变化0%,施氮量为105 kg·hm^{-2}。实验时将氮肥作为底肥一次性施入。

2 结果与分析

2.1 模型检验

利用2014—2018年定西市大田实验实测值,在降水为0%、温度为0 ℃和施氮为105 kg·hm^{-2}条件下模拟值对模型进行验证(图1)。结果表明:RMSE为112.78和306.55,NRMSE为7.47%和7.66%,M_E为0.91和0.85,小麦在灌浆期的籽粒干物质的RMSE为17.51,NRMSE为1.73%,M_E为0.98,表明模型可以较好地模拟春小麦的产量和生物量。

表2 温度、降水和施氮的模拟试验设计

Tab. 2 Simulation experiment design of temperature, precipitation and nitrogen application

温度变化量/℃	编码	降水变化比例/%	编码	施氮变化量/(kg·hm^{-2})	编码
0	0	−20	0	0	0
0.5	0.25	−10	0.25	55	0.25
1	0.5	0	0.5	110	0.5
1.5	0.75	10	0.75	220	1
2	1	20	1		

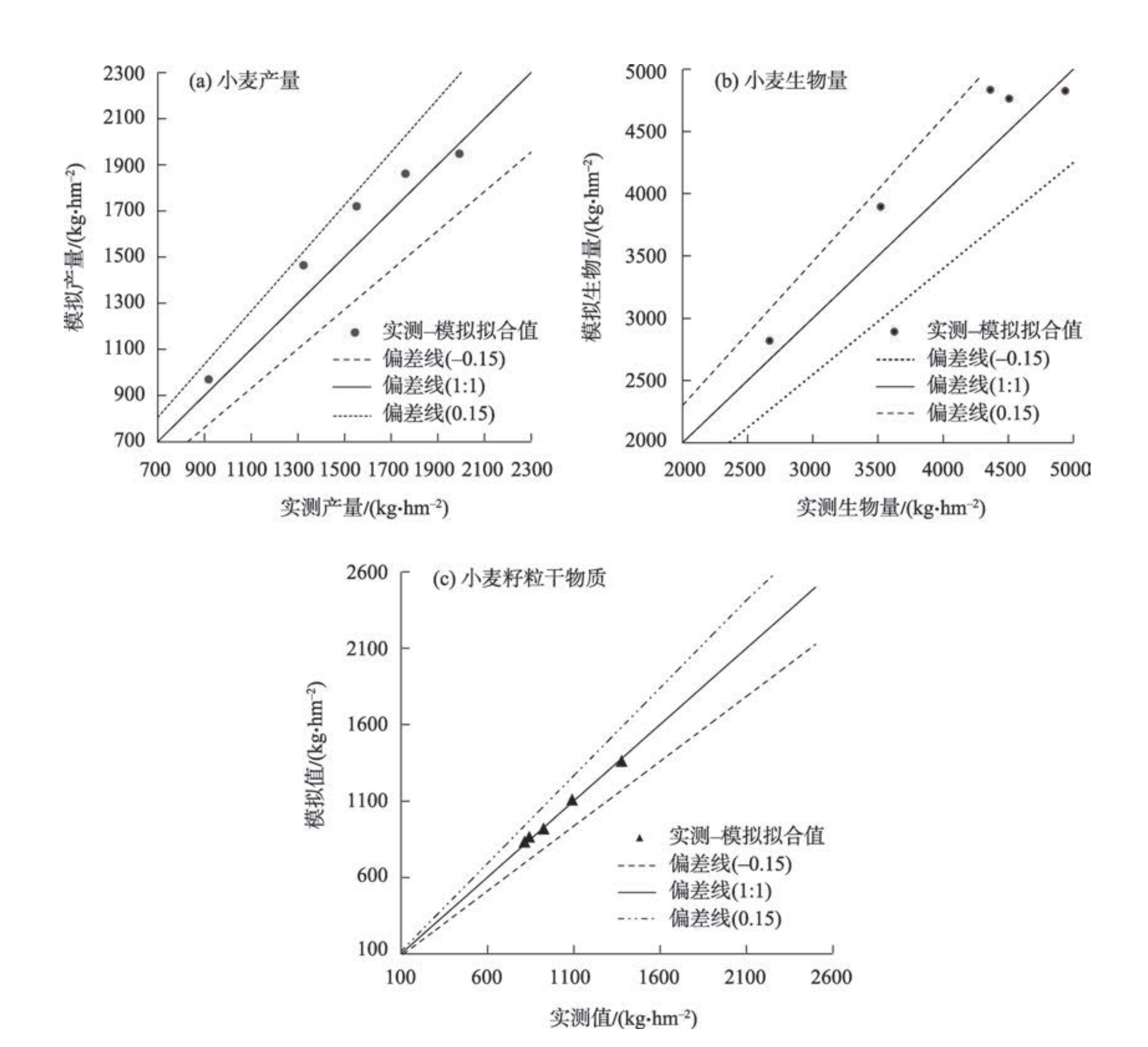


图1 小麦产量、生物量和灌浆期籽粒干物质的模拟值与实测值线性拟合

Fig. 1 Linear fitting of simulated and measured values for wheat yield, biomass and grain dry matter at grain filling stage

2.2 温度变化下水氮协同对小麦产量回归分析

在DPS数据处理系统中,以旱地春小麦的产量($Y_{产量}$)和生物量($Y_{生物量}$)为因变量,以温度(X_1)、降水量(X_2)和施氮量(X_3)为自变量,用DPS软件对5×5×4个样本进行二次多项式逐步回归分析,得出产量和生物量与温度,降水量和施氮量的二次回归方程(表3)。

对上述产量和生物量的三元二次回归方程分析可知,产量和生物量方程中的相关系数分别为0.926和0.929,各方程的相关系数均大于0.90,表明方程可以较好地反映产量和生物量与温度、降水和施氮量之间的关系。

2.2.1 *主效应分析* 综上所述,表3方程中降水量的一次项系数分别为3628.31和7626.84,表明降水量增加对产量和生物量有一定的正效应,施氮量的一次项系数分别为1796.58和5605.56,表明施氮量增加对产量和生物量有一定的正效应,温度的一次项系数分别为−452.84和−1668.56,表明温度升高对产量和生物量有一定的负效应。所以当降水和施氮量增加时,产量和生物量会增加,当温度增加时,产量和生物量减少。由于方程是在无量纲化编码条件下得到的,所以其系数的绝对值可以反映变量对产量和生物量的影响,可以看到在以产量和生物量为因变量的方程中,温度、降水量和施氮量3个因素对产量影响顺序均表现为: 降水量>施氮量>温度。

2.2.2 *单因素分析* 在进行单因素分析时,将表3中3个因素中的其他2个因素固定为0,便得到各个因素对产量和生物量影响的子方程(表4),在试验设计范围内,将各因素的值代入各个因素方程中,可得到各因素产量和生物量的效应关系。

从各因素的方程和效应图可知,温度、降水量和施氮量3个因素对产量和生物量影响效应均为抛物线形式,温度在实验设计范围内,温度增加会对春小麦产量和生物量产生呈开口向上抛物线负效应变化(图2)。当降水量和施氮量不变时,温度按试验设计梯度每升高0.5 ℃,春小麦产量和生物量最大降幅分别为5.17%和7.45%,最小降幅分别为4.11%和0.76%,平均降幅分别为4.67%和4.28%。

降水量在实验范围内,降水量增加会对春小麦产量和生物量产生呈开口向上抛物线正效应变化(图3),当温度和施氮量不变时,降水量按试验设计梯度每升高10%,春小麦产量和生物量最大增幅分别为47.46%和47.77%,最小增幅分别为26.45%和26.88%,平均增幅分别为35.53%和35.94%。

施氮量在实验范围内,当施氮量增加时,春小麦产量和生物量产生呈开口向下抛物线变化(图4),当$dY_3/dX_3=0$和$dY_6/dX_3=0$时,求得施氮量在产量和生物量的阈值为122.11 kg·hm^{-2}和129.06 kg·hm^{-2},超过阈值,产量和生物量会减少,产量和生物量的最优值为2574.86 kg·hm^{-2}和5777.39 kg·hm^{-2},施氮量按试验设计梯度每增加55 kg·hm^{-2},春小麦产量和生物量最大增幅分别为16.76%和24.53%,最小增幅分别为6.01%和9.03%,平均增幅分别为11.38%和16.42%。

2.2.3 *互作效应分析* 表2中温度和降水在产量和生物量的回归方程中交互项系数分别为−1733.76和−4143.39,交互项系数均为负值,说明在产量和生物量的形成中温度和降水相互之间为制约关系,当施氮量不变时,降水量增加对产量和生物量正效应大于温度升高对产量和生物量产生的负效应,所以当温度和降水量增加时,小麦产量和生物量整体上增加。

温度和施氮在产量和生物量的回归方程中交互项系数分别为−345.71和−535.81,交互项系数均为负值,说明在产量和生物量的形成中温度和施氮相互之间为制约关系,当降水量不变时,施氮量增加对产量和生物量正效应大于温度升高对产量和生物量产生的负效应,当温度和施氮量增加时,小麦产量和生物量整体上增加。

降水和施氮在产量和生物量的回归方程中交互项系数分别为487.02和598.04,交互项系数均为正值,说明在产量和生物量的形成中降水和施氮相

表3 因变量的回归方程

Tab. 3 regression equation of dependent variable

因变量	方程
产量	$Y_{产量}=2076.30-452.84X_1+3628.31X_2+1796.58X_3+90.92X_1^2+1254.227X_2^2-1618.41X_3^2-1733.76X_1X_2-345.71X_1X_3+487.02X_2X_3$
生物量	$Y_{生物量}=4270.61-1668.56X_1+7626.84X_2+5605.56X_3+767.23X_1^2+2721.27X_2^2-4888.72X_3^2-4143.39X_1X_2-535.81X_1X_3+598.04X_2X_3$

表4 单因素效应方程

Tab. 4 Equation of single factor effect

因变量	因素	方程
产量	温度	$Y_1 = 2076.30 - 452.84X_1 + 90.92X_1^2$
	降水量	$Y_2 = 2076.30 + 3628.31X_2 + 1254.227X_2^2$
	施氮量	$Y_3 = 2076.30 + 1796.58X_3 - 1618.41X_3^2$
生物量	温度	$Y_4 = 4270.61 - 1668.56X_1 + 767.23X_1^2$
	降水量	$Y_5 = 4270.61 + 7626.84X_2 + 2721.27X_2^2$
	施氮量	$Y_6 = 4270.61 + 5605.56X_3 - 4888.72X_3^2$

互之间为促进关系，当温度不变时，降水量和施氮量增加时，小麦产量和生物量整体上增加。

2.2.4 温度与水氮组合的关系 不同温度下小麦潜在最优产量及其对应的最佳降水量和施氮量不同。将表1中的产量方程中的温度(X_1)分别取0 ℃、0.25 ℃、0.5 ℃、0.75 ℃，1 ℃，得到在各个温度下小麦产量的方程，再利用Matlab求各个方程取得最优值时的降水量和施氮量。在试验范围内，0 ℃小麦产量达到最优值时，降水量需增加20%，应施氮156.2 kg·hm^{-2}；0.5 ℃小麦产量达到最优值时，降水量需增加20%，应施氮149.6 kg·hm^{-2}；1 ℃小麦产量达到最优值时，降水量需增加20%，应施氮131.56 kg·hm^{-2}；1.5 ℃小麦产量达到最优值时，降水量需增加20%，

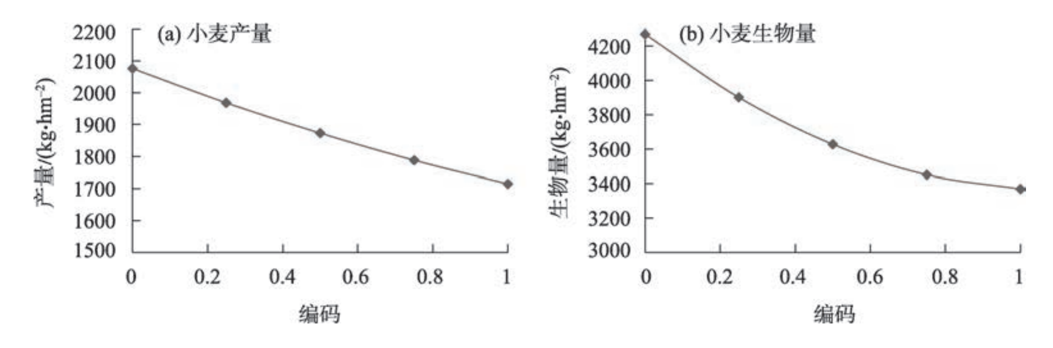


图2 小麦产量和生物量在温度变化下的效应

Fig. 2 Effects of temperature on wheat yield and biomass

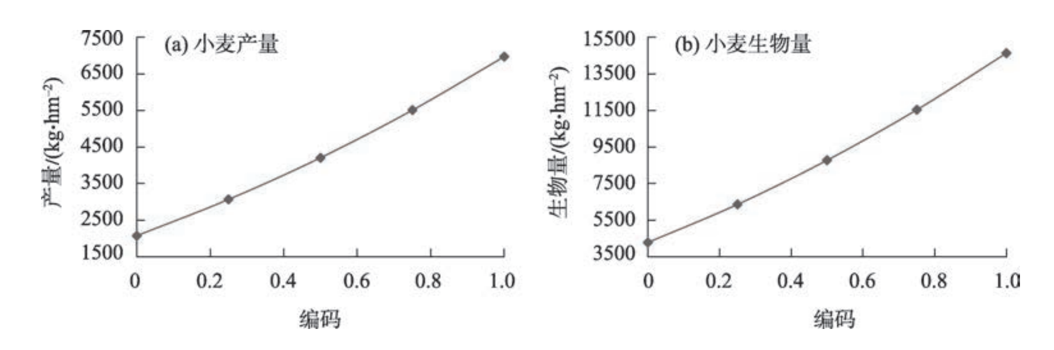


图3 小麦产量和生物量在降水变化下的效应

Fig. 3 Effects of wheat yield and biomass on precipitation change

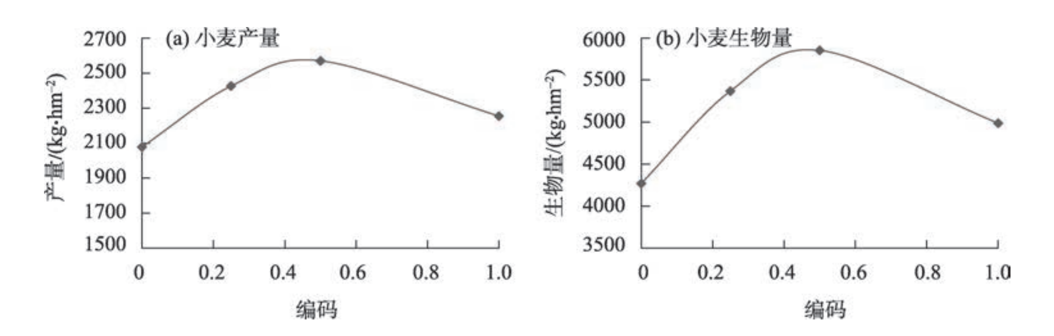
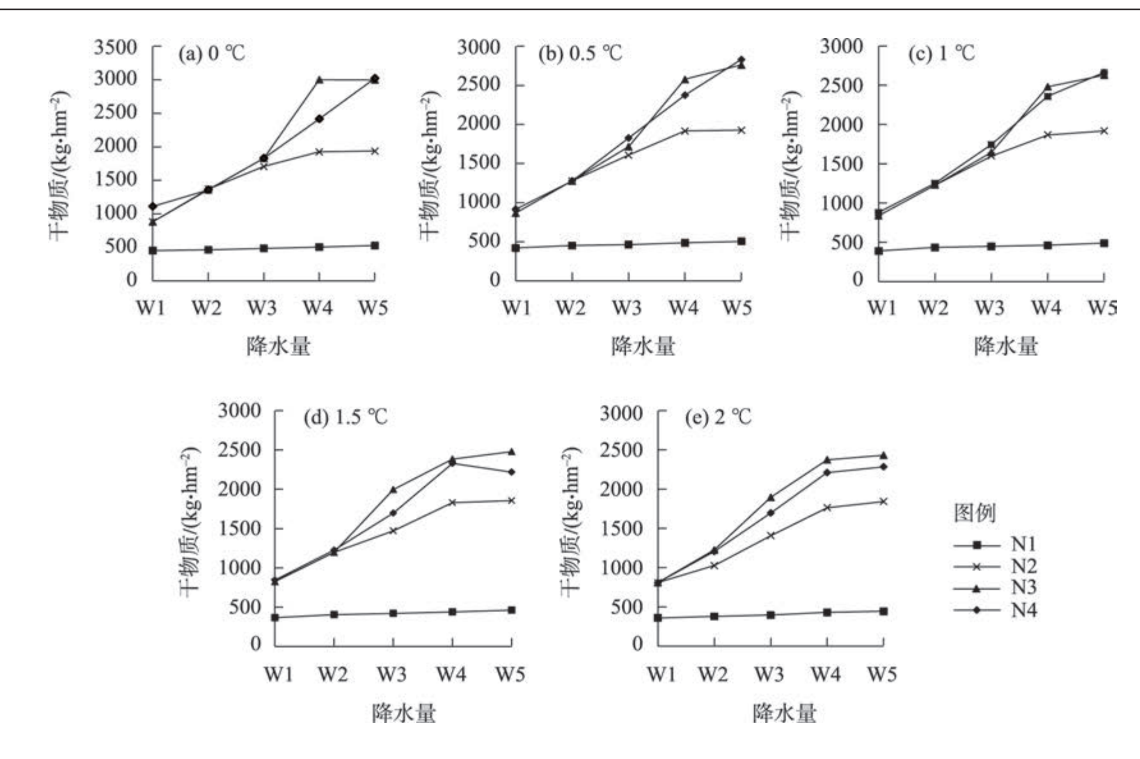


图4 小麦产量和生物量在施氮量变化下的效应

Fig. 4 Effect diagram of wheat yield and biomass under the change of nitrogen application



注:N1~N4分别表示施氮量0 kg·hm^{-2}、55 kg·hm^{-2}、110 kg·hm^{-2}和220 kg·hm^{-2};W1~W5分别表示降水量-20%,-10%,0%,10%,20%。

图5 在不同降水量、施氮量和温度变化下小麦干物质变化

Fig. 5 Dry matter change of wheat under different precipitation, nitrogen application rate and temperature

应施氮110.0 kg·hm^{-2};2 ℃小麦产量达到最优值时,降水量需增加20%,应施氮107.8 kg·hm^{-2}。

2.3 小麦灌浆期的温度与水氮耦合

在日最高温度和日最低温度为0 ℃、日降水为0%、施氮量105 kg·hm^{-2},利用模型模拟数据得出1971—2018年小麦的平均籽粒干物质为1114.2 kg·hm^{-2},图5显示了不同温度、降水量和施氮量下的灌浆期小麦籽粒干物质,在0 ℃时,当降水量和施氮量增加,小麦的籽粒干物质增加,干物质最大达到常规降水下的2.7倍,说明降水和施氮对小麦生长有较大的促进作用。为进一步研究温度升高驱动因素下,降水、施氮对春小麦的影响,对灌浆期温度升高旱地春小麦的籽粒干物质研究发现,不同温度下,不同的降水量所需的最佳施氮量不同。当温度为0 ℃、0.5 ℃、1 ℃时,降水量为20%所对应的最佳施氮量为220 kg·hm^{-2}时,小麦干物质达到最大值;温度为1.5 ℃、2 ℃时,降水量为20%,所对应的施氮量为110 kg·hm^{-2}时,小麦籽粒干物质达到最大。当施氮量和降水量不变时,温度增加,小麦的干物质减少,以0 ℃为基准,每增加0.5 ℃,小麦的籽粒干物质最小降幅为6.20%,最大降幅为18.30%,平均降幅为11.85%。

3 讨 论

本研究选取2014—2018年的产量、生物量和灌浆期小麦籽粒干物质对实验数据进行验证,5 a的值均在误差范围内,说明APSIM模型可以较好地模拟"定西35"在温度,降水量和施氮量变化下的产量和生物量。通过回归方程,单因素分析和互作效应分析对各因素变化下旱地小麦产量和生物量影响进行分析,结果表明:在本研究设计的范围内,施氮量对小麦的正效应大于温度对小麦产量和生物量的负效应,这是在温度升高的条件下,小麦的淀粉合成明显受到抑制,产量下降[14-16],氮素可使成熟期单位面积内穗数增加,合理的氮浓度可以增加小麦的产量和蛋白质含量[17],千粒重和籽粒产量呈单峰曲线变化[18]。施氮量在产量和生物量的阈值为122.11 kg·hm^{-2}和129.06 kg·hm^{-2},超过阈值产量和生物量会减少,产量和生物量的最优值为2574.86 kg·hm^{-2}和5777.39 kg·hm^{-2},这与尹嘉德等[19]在基于APSIM模型的旱地春小麦产量对施氮量和施氮深度的响应模拟中利用APSIM模拟的研究结果基本一致;温度和施氮量增加的情况下,小麦产量和生物量增

加;朱荣等[20]采用盆栽试验研究表明,适量的氮肥可以减缓温度升高对春小麦光和器官结构的影响,提高叶片的叶绿素含量和能量的高效分配。赵晶晶[21]采用裂区实验设计研究表明,高温条件下,适量氮肥能够增加产量,这与本研究结果一致。对于温度和降水之间负交互效应,降水对小麦正效应大于温度对小麦产量和生物量的负效应,降水量增加,有利于旱地麦田休闲期土壤贮水和产量提高[22-25],温度和降水量增加的情况下,小麦产量和生物量增加。张红卫等[26]采用实地实验研究表明,充足的土壤水分对小麦的蒸腾有促进作用,可以促进物质的传输,并且可以使小麦叶片温度降低;任新庄等[27]在陇中旱地春小麦产量对降水与温度变化中利用APSIM模型研究表明,降水和温度之间是负作用效应,由于降水对产量的正效应远远大于温度对小麦产量和生物量的负效应,所以春小麦呈现增产;对于施氮和降水之间正交互效应,降水对小麦产量和生物量的正效应大于施氮对小麦产量和生物量的正效应,降水和施氮量增加的情况下,小麦产量和生物量增加。有学者[28-29]通过采用大田试验方法,研究灌溉和施肥对半干旱地区春小麦产量的影响,发现丰水和高肥是半干旱地区春小麦产量最高时的组合。茹晓雅等[30]在对不同降水年型下水氮调控对小麦产量中利用APSIM模型研究表明,水和施氮量两者之间既相互协同又相互制约,水分不足时会限制氮肥的发挥,水分过多会降低氮肥淋洗。且氮对小麦的效应大于温度[7],降水对小麦的效应大于温度和施氮量[27, 31],这与本研究的结果一致。本研究结果表明,温度、降水和施氮3个因素对春小麦产量和生物量的影响均显著,但3种因素对产量和生物量的影响程度却有所不同,具体表现为:降水量>施氮量>温度。

本研究还表明,灌浆期降水和施氮量不变的条件下,温度升高小麦的籽粒干物质减少,温度每升高0.5 ℃,小麦的籽粒干物质最小降幅为6.20%,最大降幅为18.30%,平均降幅为11.85%;李广等[32]在基于APSIM模型旱地春小麦产量对温度和CO_2浓度升高的响应中研究表明,温度每升高1 ℃,春小麦产量最大降幅为14.92%,平均降幅为6.1%;张凯等[33]在温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同影响中研究表明,灌浆后期-乳熟期间,当温度增加1 ℃或2 ℃,产量将会减少30%左右。0 ℃、0.5 ℃、1 ℃小麦籽粒干物质达到最大时,降水需增加20%,施氮均为220 kg·hm^{-2};温度为1.5 ℃、2 ℃小麦籽粒干物质达到最大时,降水均需增加20%,施氮均为110 kg·hm^{-2}。高雪慧等[31]基于APSIM模型模拟陇中旱地春小麦产量对播期、施氮和降水量变化的响应中研究表明,产量达到最大时,干旱年降水量应增加20%,施氮量为105 kg·hm^{-2};平水年降水量应增加10%,施氮量为105 kg·hm^{-2};这与本研究结果基本一致,但是在籽粒干物质随温度变化的幅度上还有一定的差异,产生这种现象的主要原因是定西地区的特殊性和试验设计的不同。在试验范围内,0 ℃、0.5 ℃、1 ℃、1.5 ℃、2 ℃产量达到最优时,降水量均应增加20%,应施氮156.2 kg·hm^{-2}、149.6 kg·hm^{-2}、131.56 kg·hm^{-2}、110.0 kg·hm^{-2}、107.8 kg·hm^{-2}。这与前人的研究结果[34-35]基本一致,温度升高下,降低施肥的分量和保持适当的降水可以减缓小麦产量的下降,得到较高的小麦产量。

本研究利用APSIM模型可以增加试验的重复次数和多因素协同处理的优点,进行多年的情景研究,分析了温度升高下,降水和施氮三因素与旱地春小麦产量和生物量之间的关系,灌浆期不同温度下降水和施氮对籽粒干物质的影响,得到不同温度下最佳降水量和最佳施氮量,为春小麦应对未来气候变化提供了理论依据。

4 结 论

利用2014—2018年的实测值和模拟值验证了APSIM模型在试验地区具有较好地适应性,发现模型能够较好地模拟温度、施氮和降水对春小麦产量和生物量的影响。具体影响顺序为:降水>施氮>温度。研究发现在未来天气变化下,施氮量为122.11 kg·hm^{-2}和129.06 kg·hm^{-2},产量和生物量的最优值为2574.86 kg·hm^{-2}和5777.39 kg·hm^{-2},温度与水氮耦合的最优方案,各个温度下产量达到最优时,降水量均应增加20%,应施氮156.2 kg·hm^{-2}、149.6 kg·hm^{-2}、131.56 kg·hm^{-2}、110.0 kg·hm^{-2}、107.8 kg·hm^{-2}。合理的水氮协同能够减缓温度升高对产量的负效应,可以为水肥协同应对未来温度升高下旱地春小麦生产提供基础理论依据。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[C]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 2013.

[2] IPCC. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[3] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[4] 柳媛普, 张强, 赵建华, 等. 气温升高对黄土高原半干旱区陆面特征影响的数值模拟[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1097−1102. [Liu Yuanpu, Zhang Qiang, Zhao Jianhua, et al. Numerical simulation of influence of temperature rise on land surface characteristics in semi-arid area of Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1097−1102.]

[5] 逯玉兰, 李广, 韩俊英, 等. 降水量和气温变化对定西地区旱地春小麦产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 268−273. [Lu Yulan, Li Guang, Han Junying, et al. Effects of precipitation and air temperature on spring wheat yield in dry land of Dingxi Region[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 47(3): 268−273.]

[6] 曹峰, 张祎. 气候变化下灌溉对旱地小麦产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(22): 169−171. [Cao Feng, Zhang Yi. Effects of irrigation on wheat yield in dryland under climate change[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(22): 169−171.]

[7] 刘永环, 贺明荣, 王晓英, 等. 不同氮温组合对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2008(1): 57−59. [Liu Yonghuan, He Mingrong, Wang Xiaoying, et al. Effects of different nitrogen temperature combinations on grain yield and quality of wheat[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2008(1): 57−59.]

[8] 张涛, 马富裕, 郑重, 等. 滴灌条件下水氮耦合对春小麦光合特性及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(6): 69−73. [Zhang Tao, Ma Fufu, Zheng Zhong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics and yield of spring wheat under drip irrigation[J]. Journal of Northwest Agricultural Sciences, 2010, 19(6): 69−73.]

[9] 卓玛草, 李广, 马维伟, 等. 近45年来甘肃省雨养农业区气候变化的时空特征[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 200−206. [Zhuo Macao, Li Guang, Ma Weiwei, et al. Temporal and spatial characteristics of climate change in rain-fed agricultural areas of Gansu Province in recent 45 years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 200−206.]

[10] 李广, 黄高宝, William Bellotti, 等. APSIM模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2655−2663. [Li Guang, Huang Gaobao, William Bellotti, et al. Application of APSIM model to different tillage practices in Loess Hilly-gully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2655−2663.]

[11] Gaydon D S, Singh B, Wang E, et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia[J]. Field Crops Research, 2017, 204: 52−75.

[12] Anuytrecht E, Thorburn P J. Responses to atmospheric CO_2 concentrations in crop simulation models: A review of current simple and semicomplex representations and options for model development[J]. Global Change Biology, 2017, 23: 1806−1820.

[13] Hammer G, Oosterom E V, Mclean G, et al. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61: 2185−2202.

[14] Enner C F, Denyer K, Guerin J. Thermal characteristics of soluble starch synthase from wheat endosperm[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1995, 22: 703−709.

[15] 张云兰, 王龙昌, 邹聪明, 等. 高温伏旱区旱地农作系统水分供需平衡特征与生态适应性研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 95−100, 105. [Zhang Yunlan, Wang Longchang, Zou Congming, et al. Study on water supply and demand balance characteristics and ecological adaptability of dryland farming system in high temperature and arid region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 95−100, 105.]

[16] 赵鸿, 肖国举, 王润元, 等. 气候变化对半干旱雨养农业区春小麦生长的影响[J]. 地球科学进展, 2007, 22(3): 322−327. [Zhao Hong, Xiao Guoju, Wang Runyuan, et al. Effects of climate change on spring wheat growth in semi-arid rain-fed agricultural areas [J]. Advance in Earth Sciences, 2007, 22(3): 322−327.]

[17] Wrigley C W, Blumenthal C S, Gras P W, et al. Temperature variation during grain filling and changes in wheat-grain quality[J] . Australian Journal of Plant Physiology, 1994, 21: 875−885.

[18] 柯忻, 赵金峰, 郭程瑾, 等. 氮素用量对节水条件下小麦生育特性和产量的调控效应[J]. 河北农业大学学报, 2009(6): 14−19. [Ke Xin, Zhao Jinfeng, Guo Chengjin, et al. Regulation effect of nitrogen dosage on wheat growth characteristics and yield under water saving condition[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2009(6): 14−19.]

[19] 尹嘉德, 张俊英, 侯慧芝, 等. 基于APSIM模型的旱地春小麦产量对施氮量和施氮深度的响应模拟[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 775−783. [Yin Jiade, Zhang Junying, Hou Huizhi, et al. Simulation of spring wheat yield response to nitrogen application rate and nitrogen application depth in dryland based on APSIM model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 775−783.]

[20] 朱荣, 慕宇, 康建宏, 等.不同施氮量对花后高温春小麦叶绿素含量及荧光特性的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(4): 609−615. [Zhu Rong, Mu Yu, Kang Jianhong, et al. Effects of different nitrogen application rates on chlorophyll content and fluorescence characteristics of spring wheat at high temperature after anthesis

[J]. Journal of Southern Agricultural Sciences, 2017, 48(4): 609-615.]

[21] 赵晶晶. 花后高温胁迫下不同施氮量对春小麦产量形成的影响机理[D]. 银川: 宁夏大学, 2016. [Zhao Jingjing. Effect Mechanism of Different Nitrogen Application Rates on Spring Wheat Yield Formation under Post-anthesis High Temperature stress[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016.]

[22] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 近54年来晋南气候变化及其对旱地小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(11): 1502-1509. [Pei Xuexia, Dang Jianyou, Zhang Dingyi, et al. Climate change and its effects on dryland wheat yield in southern Shanxi during the past 54 years[J]. Journal of Triticle Crops, 2016, 36(11): 1502 -1509.]

[23] Qiu G Y, Wang L M, He X H, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the north China plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 1848-1859.

[24] Huang M B, Gallichand J, Zhong L P. Water-yield relationships and optimal water management for winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Irrigation Science, 2004, 23: 47-54.

[25] 祁小平, 李广, 袁建钰, 等. 保护性耕作对陇中旱作麦田蓄水保墒效果和产量的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 312-321. [Qi Xiaoping, Li Guang, Yuan Jianyu, et al. Effects of conservation tillage on water and soil moisture retention and yield in dryland wheat fields in central Longzhong[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 312-321.]

[26] 张红卫, 陈怀亮, 杨志清, 等. 土壤水分变化对冬小麦蒸腾速率的影响[J]. 河南农业科学, 2010, 39(7): 10-14. [Zhang Hongwei, Chen Huailiang, Yang Zhiqing, et al. Effects of soil moisture on transpiration rate of winter wheat[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2010, 39(7): 10-14.]

[27] 任新庄, 闫丽娟, 李广, 等. 陇中旱地春小麦产量对降水与温度变化的响应模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 125-129, 155. [Ren Xinzhuang, Yan Lijuan, Li Guang, et al. Simulation of response of spring wheat yield to precipitation and temperature change in dryland of central Longzhong[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 125-129, 155.]

[28] 李文龙, 苏敏, 李自珍. 集水灌溉和施肥对半干旱区春小麦生态位适宜度和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 42-48. [Li Wenlong, Su Min, Li Zizhen. Effects of catchment irrigation and fertilization on niche suitability and yield of spring wheat in semi-arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 42-48.]

[29] 李玥, 牛俊义, 李广, 等. 黄土丘陵区旱地春小麦气候适宜度及其变化特征——以定西市李家堡乡麻子川村为例[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 627-635. [Li Yue, Niu Junyi, Li Guang, et al. Climate suitability and its variation characteristics of spring wheat in upland Loess Hilly region: A case study of Mazichuan Village, Lijiapu Town, Dingxi City[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4): 627-635.]

[30] 茹晓雅, 李广, 陈国鹏, 等. 不同降水年型下水氮调控对小麦产量及生物量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(11): 1725-1734. [Ru Xiaoya, Li Guang, Chen Guopeng, et al. Effects of groundwater nitrogen regulation on wheat yield and biomass in different precipitation years[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(11): 1725-1734.]

[31] 高雪慧, 刘强, 王钧. 基于APSIM模型的陇中旱地春小麦产量对播期、施氮和降水量变化的响应模拟[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(3): 371-379. [Gao Xuehui, Liu Qiang, Wang Jun. Simulation of spring wheat yield response to sowing date, nitrogen application and precipitation in dryland in central Gansu Province based on APSIM model[J]. Journal of Wheat Crops, 2022, 42(3): 371-379.]

[32] 李广, 李玥, 黄高宝, 等. 基于APSIM模型旱地春小麦产量对温度和CO_2浓度升高的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1088-1095. [Li Guang, Li Yue, Huang Gaobao, et al. Response of spring wheat yield to temperature and CO_2 concentration increase in dryland based on APSIM model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1088-1095.]

[33] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(3): 413-421. [Zhang Kai, Wang Runyuan, Wang Heling, et al. Synergistic effects of temperature increase and precipitation decrease on growth and yield of spring wheat in semi-arid region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 413-421.]

[34] 李强, 薛耀英, 高小叶, 等. 升温、灌溉和施氮对冬小麦产量的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2017, 35(1): 52-57, 71. [Li Qiang, Xue Yaoying, Gao Xiaoye, et al. Effects of temperature rise, irrigation and nitrogen application on winter wheat yield[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Sciences Edition), 2017, 35(1): 52-57, 71.]

[35] 张娟, 李广, 袁建钰, 等. 水氮调控对旱作春小麦土壤、叶片养分含量的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1750-1759. [Zhang Juan, Li Guang, Yuan Jianyu, et al. Effects of water and nitrogen regulation on soil and leaf nutrient contents of spring wheat in dry farming [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1750-1759.]

Simulation and analysis of the effects of precipitation and nitrogen application on the yield and biomass of spring wheat in dryland under elevated temperature

ZHANG Kang[1], NIE Zhigang[1,2], WANG Jun[1], LI Guang[3]

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To explore the effects of temperature increase, water decrease, and nitrogen application on spring wheat yield and biomass in semi-arid areas. Based on the meteorological data from 1971 to 2018 in the Anding District, Dingxi City, and the field test data from 2014 to 2018 in the Anjiagou Village, Fengxiang Town, Anding District, Dingxi City, and Gansu Province, this study conducted five temperature gradient (0 ℃,0.5 ℃,1 ℃,1.5 ℃, 2 ℃), five precipitation gradient (−20%, −10%, 0%, 10%, and 20%), and four nitrogen treatments (0 kg·hm^{-2}, 55 kg·hm^{-2}, 110 kg·hm^{-2}, and 220 kg·hm^{-2}) to analyze the yield and biomass of spring wheat in dryland using regression equation, single factor analysis, and interaction analysis. The wheat yield was analyzed using the relationship between temperature increase and nitrogen application. The results show that: (1) The normalized root mean square error (NRMSE) of wheat yield and biomass simulated by the model was 7.47% and 7.66%, respectively, and the model validity index was 0.91 and 0.85, respectively. The NRMSE of wheat yield and biomass simulated by the model was 1.73%, and the model validity index was 0.98. The results showed that the model could well reflect the effects of temperature, precipitation, and nitrogen application on spring wheat yield and biomass. (2) When the temperature increased, spring wheat yield and biomass showed a parabolic negative effect. Spring wheat yield and biomass presented a downward parabola with a threshold of 122.11 kg·hm^{-2} and 129.06 kg·hm^{-2}, respectively, and the optimal yield and biomass values were 2574.86 kg·hm^{-2} and 5777.39 kg·hm^{-2}, respectively. The increased precipitation has a positive opening parabolic effect on spring wheat yield and biomass. (3) The interaction between the temperature and the nitrogen application rate was negative. The interaction between temperature and precipitation was negative. The interaction between the nitrogen application rate and precipitation was positive. (4) When the yield was optimal at 0 ℃,0.5 ℃,1 ℃,1.5 ℃ and 2 ℃, precipitation should be increased by 20%, and nitrogen application should be 156.2 kg·hm^{-2}, 149.6 kg·hm^{-2}, 131.56 kg·hm^{-2}, 110.0 kg·hm^{-2}, and 107.8 kg·hm^{-2}, respectively. (5) The effect order of temperature, nitrogen application, and precipitation on yield is precipitation > nitrogen application > temperature. Reasonable coordination of water and nitrogen can mitigate the negative effect of temperature increase on yield.

Keywords: APSIM; wheat; temperature; precipitation; nitrogen application; biomass; yield